

Braunschweigische
Wissenschaftliche Gesellschaft

Jahrbuch 2019

Sonderdruck
Seiten 99–112



J. CRAMER Verlag • Braunschweig
2020

Über das Zusammenwirken von Fluiden und festen Körpern*

DIETER DINKLER

Institut für Statik, Technische Universität Braunschweig, Beethovenstr. 51,
DE-38106 Braunschweig, E-Mail: d.dinkler@tu-bs.de

1. Motivation

Fluide und feste Körper sind allgegenwärtig. *Fluide* sind – makroskopisch betrachtet – Kontinua, deren einzelne Atome Platzwechsel erfahren, also keine feste Zuordnung zueinander haben. Dies sind Gase und Flüssigkeiten. *Feste Körper* sind Kontinua, deren einzelne Atome in der Regel eine feste Zuordnung zueinander besitzen. Dies können organische oder anorganische Systeme sein: Lebewesen, Bauwerke, Maschinen, ...

Das Zusammenwirken von Fluiden und festen Körpern ist so selbstverständlich, dass wir die Phänomene in Natur und Technik kaum noch bewusst wahrnehmen. Dennoch prägen sie unsere Wahrnehmungen und unser Verhalten in vielfältiger Weise. Luft, Wasser und andere Fluide treten mit natürlichen und künstlichen festen Körpern an den gemeinsamen Grenzflächen auf allen räumlichen und zeitlichen Skalen in Kontakt. Sie tauschen hier Bewegungsenergie und Wärme sowie Partikel und chemische Substanzen aus, wobei auch Erosion, Ablagerungen und chemische Reaktionen die Folge sein können.

Schon die Bewegung eines Baumes im Wind weist äußerst komplexe Phänomene auf, die wir zwar insgesamt wahrnehmen, jedoch nur mit unserer Erfahrung anschaulich erklären können. Die Schwierigkeit ist, dass die Luftströmung nicht sichtbar ist, sondern nur an der Wirkung erkennbar. Dies führt in der Regel zu der Annahme, dass der Wind die Ursache ist und die Bewegung des Baumes die Reaktion. Deshalb ist die Interpretation der Phänomene schwierig: *Spielt* der Wind mit den Blättern oder stellt sich der Baum der ungestörten Anströmung in den Weg. Hier gibt es entgegen der Anschauung keine Kausalität, da der Baum mit seinen feinsten Verästelungen und die bis in kleinste Strukturen aufgelöste Umströmung der Blätter des Baumes *zusammenwirken*. Insbesondere kann man

* Der Vortrag wurde am 11.10.2019 vor der Plenarversammlung der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft gehalten.



Abb. 1-1: Fluid–Struktur–Systeme.

Quelle Abb.1-1 links: Deutsche Stiftung Meeresschutz

nicht feststellen, dass die Strömung die Blätter bewegt oder die Blätter den Weg der Strömung verändern, sondern mit der Bewegung der Blätter verändert sich gleichzeitig die Strömung. Die Um- bzw. Durchströmung des Baumes und der Baum wirken daher als ein gemeinsames System, dessen Phänomenologie von der Geometrie des Baumes, seiner Masse und seinen Steifigkeiten sowie von den Strömungsverhältnissen mit Windgeschwindigkeit, Turbulenz, Dichte der Luft, Temperatur und dem Luftdruck abhängt.

Abb. 1-1 links verdeutlicht an einer Windkraftanlage die Verknüpfung von Fluiden in Form von Luft und Wasser mit festen Körpern in Form von Rotorblättern und Pylon. Vergleichbare Phänomene zeigen Hubschrauberrotorblätter, Propeller oder Ventilatoren. Im Bild rechts ist die Durchströmung einer Arterie angedeutet, bei der das mit unterschiedlichen Substanzen besetzte Blutplasma mit der elastischen Gefäßwandung zusammenwirkt, was sich mechanisch in der Verformung der Gefäßwandung und chemisch mit dem Austausch von Substanzen äußert. Weniger komplex ist die Durchströmung von Rohren oder Schläuchen.

Auch bei der Umströmung von Bauwerken kann das Zusammenwirken von Fluiden und festen Körpern beobachtet werden, auch wenn die Veränderung der Umströ-

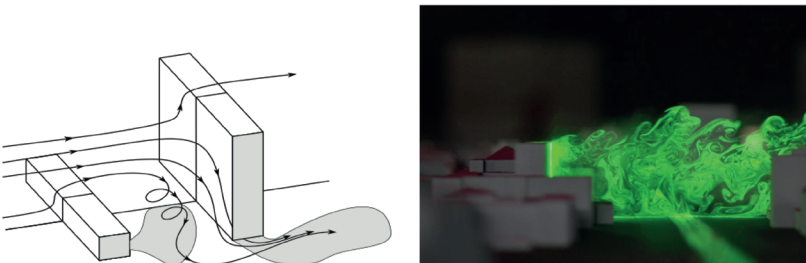


Abb. 1-2: Umströmung von Bauwerken

Quelle: EWTl@UNI-Hamburg.de



Abb. 1-3: Bewegung einer Membran im Wind.

Quelle: planet-wissen.de

mung deutlich ist und die Bewegung der Bauwerke aufgrund der großen Steifigkeiten oft vernachlässigbar ist. In Abb. 1-2 ist die Umströmung eines *stumpfen, nicht stromlinigen* Bauwerks dargestellt. Links im Bild verdeutlicht eine Prinzipskizze den Weg des Windes um das Hindernis. Rechts zeigt die Visualisierung der Umströmung im Windkanal wie komplex reale Strömungen sind: Aufstauung im Bereich der Anströmung und Turbulenz im Nachlauf des Bauwerks.

Als anderes Extrem kann man die Bewegung von Membranen verstehen, die ihre Geometrie aufgrund verschwindender Biegesteifigkeit gemeinsam mit der Umströmung verändern. Membranen sind Zelte, Segel, Fahnen und andere feste Körper, deren Bewegung man intuitiv als *Flattern* bezeichnet, siehe Abb. 1-3.

Wissenschaftlich folgen aus dem Zusammenwirken von Fluiden und festen Körpern äußerst interessante Fragestellungen bei der Interpretation der Phänomenologie und bei der mathematisch-mechanischen Modellbildung. Katastrophale Ereignisse in unterschiedlichen technischen Bereichen haben zu zahlreichen wissenschaftlichen Studien mit dem Ergebnis geführt, dass die Phänomenologie in technischen Systemen heute weitgehend verstanden ist. Grundlegende Fragestellungen und Phänomene sind bei Schiffen, Flugzeugen und Brücken identifiziert und heute soweit charakterisiert, dass die Bemessungsrichtlinien entsprechende Sicherheitsnachweise verlangen. Nachfolgende Anwendungsbeispiele sind bei weitem nicht vollständig, sondern sollen lediglich einen Einblick in die Phänomenologien geben. Für besonders Interessierte sei auf die Arbeiten von Försching [8], Bisplinghoff & Ashley [3], Fung [9], Simiu & Scanlan [16], Sockel [17], u.a. verwiesen.

2. Zusammenwirken von starren Körpern und Fluiden

Die Bewegung eines starren, nicht deformierbaren Körpers kann vereinfachend mit den Verschiebungen und Verdrehungen seines Schwerpunktes beschrieben werden. Treten starre Körper mit Fluiden in Kontakt, kann die auf den Körper wirkende Druckverteilung ebenfalls auf den Schwerpunkt reduziert werden, sodass die Erhaltungssätze des Gesamtsystems für die Bewegung des Schwerpunktes formuliert werden können. Nachfolgende Fallbeispiele charakterisieren das für

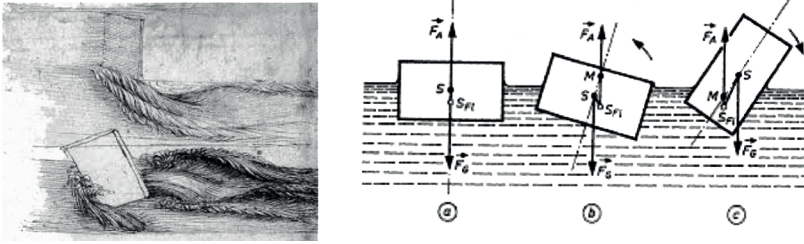


Abb. 2-1: Stabilität eines schwimmenden Rechteckprofils.

Quelle: depositance.tu.berlin.de

Quelle: web.physik.rwth-aachen.de

technische Fragestellungen entscheidende Phänomen der *Stabilität*. Technische Systeme müssen so entworfen und bemessen sein, dass sie im Gebrauchszustand *stabil* sind und eine kleine Störung keine katastrophalen Folgen hat.

Lagestabilität von Schiffen

Das Zusammenwirken von festen Körpern mit Wasser wird mit Anwendungsbezug auf die Stabilität von Schiffen bereits seit der Antike untersucht. Nowacki und Ferreira [12] geben einen Überblick auf die historische Entwicklung der Arbeiten zur Stabilität von Schiffen. Archimedes [2] entwickelt erste systematische Grundlagen der Hydrostatik und der Stabilität von Schiffen gegen Kippen. Leonardo da Vinci untersucht die Bewegung von Flüssigkeiten. Abb. 2-1 links zeigt die Skizze der Umströmung eines festen Körpers. Im 18. Jahrhundert folgen erste systematische Untersuchungen zur Stabilität von Schiffen. Bouguer [4] definiert das *Metazentrum*, das in einer stabilen Schifflage oberhalb des Massenschwerpunktes des Schiffes liegen muss. Euler [7] erklärt die Schiffsstabilität mit Gleichgewichtsbedingungen. Abb. 2-1 rechts veranschaulicht das Gleichgewicht am Beispiel eines in Wasser eingetauchten Rechteckquerschnitts. F_G ist das Gewicht des Schiffes, S die Schwerpunktlage der Schiffsmasse. F_A ist der Auftrieb infolge verdrängtem Wasser und S_{FL} ist die Schwerpunktlage des Auftriebs. M ist das Metazentrum.

In der Gleichgewichtslage liegen die Wirkungslinien von Schiffsgewicht und Auftrieb auf einer Geraden. Skizze *a* kennzeichnet die Ruhelage des stabilen Rechteckprofils. Bei einer Störung der Ruhelage kippt das Schiff, siehe Skizze *b*. Infolge der Verschiebung der Schwerpunkte von Gewicht und Auftrieb entsteht jedoch ein rückdrehendes Moment, das das Schiff stabilisiert. Das Metazentrum ist definiert als Schnittpunkt der Wirkungslinie des Auftriebs und der verdrehten Schwerachse des Rechteckprofils. In diesem Fall liegt das Metazentrum oberhalb des Gewichtsschwerpunktes S . Skizze *c* verdeutlicht eine instabile Lage des Rechteckprofils. Der Gewichtsschwerpunkt liegt jetzt oberhalb des Auftriebsschwerpunktes, das Metazentrum unterhalb des Gewichtsschwerpunktes. Bei einer Störung bewirkt das dabei entstehende Moment ein weiteres Anwachsen der Schiefstellung, sodass

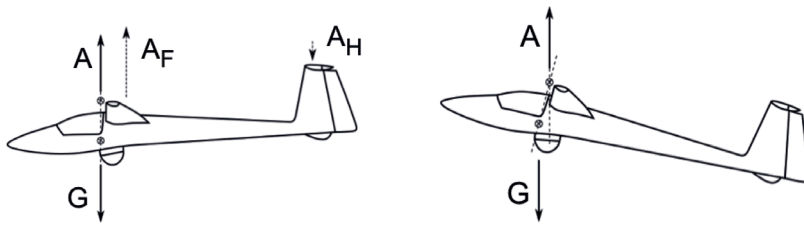


Bild 2-2 Längsstabilität eines starren Flugzeuges – ohne Widerstand und Schub.

das Schiff kentert. Spektakuläres Beispiel aus der Schifffahrt ist der Untergang des schwedischen Schiffes *Vasa*, das bei der ersten Fahrt gekentert ist. Die Stabilisierung des Schiffes ist mit einer Verlagerung des Gewichtsschwerpunktes mithilfe von Ballast im unteren Bereich des Profils möglich.

Diese sehr essentielle statische Gleichgewichtsbetrachtung verdeutlicht das Zusammenwirken des Auftrieb erzeugenden Fluids und des als Rechteck idealisierten festen Körpers.

Längsstabilität von Flugzeugen

Eine der Kippstabilität von Schiffen vergleichbare Fragestellung ist bei der Längsstabilität von Flugzeugen vorhanden. In einer stabilen Fluglage befindet sich das Eigengewicht des Flugzeugs mit dem mit der Fluggeschwindigkeit steigenden Auftrieb im Gleichgewicht, wenn die Wirkungslinie des Gewichtes und des Auftriebs auf einer Geraden liegen. Bei einer Störung der Anströmgeschwindigkeit des Flugzeugs verändert sich die Strömung und damit die Schwerpunktlage des Auftriebs, sodass die Flugstabilität untersucht werden muss. Abb. 2-2 skizziert eine stabile Fluglage links im Bild, wobei Luftwiderstand und Schub vereinfachend nicht dargestellt sind. G ist das Flugzeuggewicht, $A = A_F + A_H$ der Gesamtauftrieb, A_F der Auftrieb des Flügels und A_H der Auftrieb/Abtrieb des Höhenruders. Die Größe des Auftriebs und die Lage des Auftriebsschwerpunktes verändern sich bei einer Änderung des Anstellwinkels, sodass die Fluglage in der Regel mithilfe von Höhenrudern stabilisiert wird. Im Bild rechts ist eine gestörte Lage dargestellt, bei der das infolge A und G entstehende rückdrehende Moment das Flugzeug auch ohne Höhenruder stabilisiert. Im Gegensatz dazu ist eine instabile Fluglage möglich, wenn der Auftriebsschwerpunkt unterhalb des Gewichtsschwerpunktes liegt, also bei Flugzeugen mit tiefliegenden Flügeln oder wenn sich die Wirkung des Höhenleitwerks bei der Störung verstärkt.

Erste Arbeiten zur Flugstabilität sind bereits 1903 von Williams und Bryan [20] veröffentlicht. Sie verwenden linearisierte Differentialgleichungen für die mathematische Untersuchung der Längsbewegung starrer Flugzeuge. In nachfolgenden

Arbeiten werden die Modellgleichungen sukzessive erweitert und als neues Fachgebiet der *Flugmechanik* etabliert.

3. Instabilität elastisch gelagerter Flügelprofile

Die Annahme der Starrheit fester Körper ist in der Regel stark vereinfachend, sodass viele für die Sicherheit wesentliche Phänomene nicht untersucht werden können.

Flutter-Phänomene am Laminarflügel

Erste Ansätze zur Berücksichtigung der Elastizität fester Körper stammen aus dem Flugzeugbau, da aufgrund der leichten Bauweise große Verformungen auftreten können, die das Zusammenwirken von Luft und nachgiebiger Struktur verändern. Das Fachgebiet wird heute als *Aeroelastizität* bezeichnet. Aufgrund erster Flugunfälle in den 1920er Jahren gab es bereits früh verschiedene wissenschaftliche Untersuchungen, von denen die Veröffentlichung von Theodorsen [18] grundlegend ist.

Theodorsen untersucht die Bewegung eines elastisch gelagerten Flügelprofils in einer Potentialströmung, siehe Bild 3-1. Das Profil ist als starr angesetzt, die elastische Lagerung bezüglich Schlag- und Drehbewegung repräsentiert die Elastizität des Flügels. u_∞ ist die Fluggeschwindigkeit, α der Anstellwinkel, β der Anstellwinkel der Klappe und h die vertikale Verschiebung. S ist der Schubmittelpunkt und N der aerodynamische Neutralpunkt. Integriert man die Druckverteilung über den Umfang des Profils, so folgt die Auftriebskraft A und das aerodynamische Moment M bezüglich des Neutralpunktes. Hierbei ist das im Neutralpunkt wirkende Moment bei einer Änderung des Anstellwinkels konstant. Für den vereinfachenden Fall eines Profils ohne Klappenanstellung β interagieren Profil und Umströmung bei einer Störung folgendermaßen:

- Ein stabiler Flugzustand stellt sich ein, wenn die Drehbewegung $\alpha(t)$ mit der Schlagbewegung $h(t)$ in Phase ist: Infolge der nicht im Schubmittelpunkt S ,

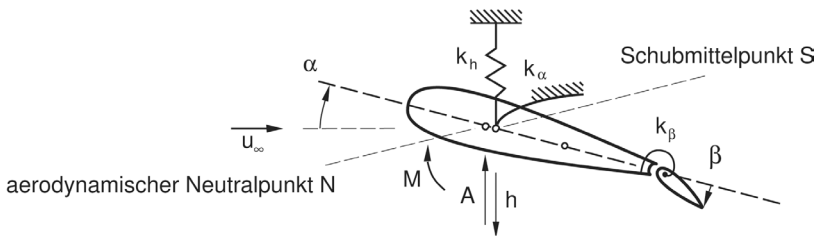


Abb. 3-1: Elastisch gelagertes Flügelprofil.

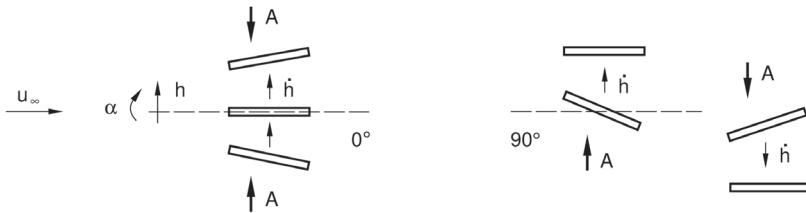


Abb. 3-2: Biege-Torsions-Flattern eines elastisch gelagerten Flügelprofils.

sondern im Viertelpunkt T angreifenden Auftriebskraft A verdreht sich das Profil um $\Delta\alpha$ im Uhrzeigersinn. Mit der Vergrößerung des Anstellwinkels vergrößert sich auch die Auftriebskraft, bis das angreifende Moment aus Auftrieb mit dem in der Drehfeder ansteigenden Rückstellmoment im Gleichgewicht ist. In vertikaler Richtung ist der Auftrieb mit der rückstellenden Kraft in der Zug-Druck-Feder im Gleichgewicht. Während einer Schwingung heben sich die von der Auftriebskraft A und dem Moment M geleisteten Arbeiten auf, siehe Abb. 3-2 links.

- Ein instabiler Flugzustand mit anwachsenden Verformungen kann sich einstellen, wenn die Drehbewegung $\alpha(t)$ um $\pi/2$ von der Schlagbewegung $h(t)$ verschoben ist. Abb. 3-2 rechts zeigt, dass die Auftriebskraft während einer Schwingung kontinuierlich Arbeit leistet, die in den Federn gespeichert werden muss und so zu anwachsenden Amplituden führt. Das Phänomen wird als *Biege-Torsions-Flattern* bezeichnet, da mit $h(t)$ und $\alpha(t)$ die Schlag- und die Torsionsbewegung des Flügels charakterisiert sind.
- Eine weitere instabile Bewegung ist möglich, wenn das Ruder elastisch mit dem Flügel verbunden ist, und die Schlagbewegung mit der Ruderdrehung interagiert. Abb. 3-3 rechts verdeutlicht, dass die von den Auftriebskräften am Ruder geleistete Arbeit kontinuierlich ansteigt und von der Drehfeder aufgenommen wird, wenn die Phasenverschiebung zwischen Schlag- und Drehbewegung den Wert $\pi/2$ erreicht.

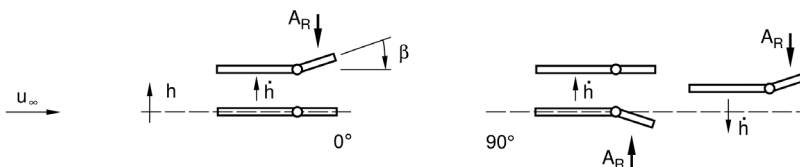


Abb. 3-3: Ruder-Flattern eines elastisch gelagerten Flügelprofils.

Segelflugzeug - SB 9

akaflieg-braunschweig.de

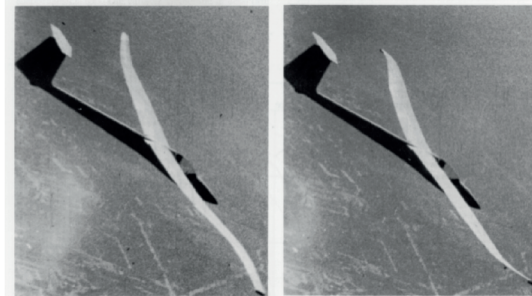


Abb. 3-4: Querruder-Flattern der SB 9 [1].

Eine sehr anschauliche Erklärung des Ruder-Flatterns zeigen die von der *Akaflieg Braunschweig* vorgenommenen Flugversuche mit dem Segelflugzeug SB 9 [1], die in einem Film zur Diskussion stehen. Abb. 3-4 verdeutlicht zwei für die Instabilität verantwortliche Verformungsmoden des Flugzeuges, bei denen im rechten Bild die symmetrische Flügelbiegung mit den Querruderdrehungen zusammenwirkt und im linken Bild die antisymmetrische Verformung zusätzlich mit der Torsion des Rumpfes und dem Höhenleitwerk.

Hochauftriebsflügel mit Coandă-Klappe

Im Sonderforschungsbereich 880 *Grundlagen des Hochauftriebs künftiger Verkehrsflugzeuge* [14] werden neuartige Konzepte zur Reduktion der Lärmemissionen und zur Erhöhung des Auftriebs in Start- und Landekonfigurationen untersucht. Die Erhöhung des Auftriebs wird mit dem bereits seit 1800 [21] bekannten Coandă-Effekt erreicht. Hierbei wird ein Luftstrahl im Bereich der angestellten Klappe mit großer Geschwindigkeit aus dem Profil gedrückt, sodass die Strömung nicht abreißt, sondern auch bei großen Anstellwinkeln weiterhin anliegt. Abb. 3-5 zeigt links die Stromlinien um ein Profil im Geradeausflug. Das mittlere Bild verdeutlicht den Strömungsabriss bei angestellter Klappe, der eine Verringerung des Auftriebs bewirkt. Bei Einsatz des Coandă-Strahls liegt die Strömung auch bei großen Klappenanstellwinkeln weiterhin an, sodass eine erhebliche Erhöhung des Auftriebs die

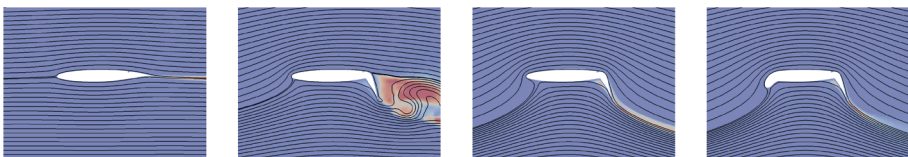


Abb. 3-5: Stromlinien eines Hochauftriebsprofils mit Coandă-Klappe [11].

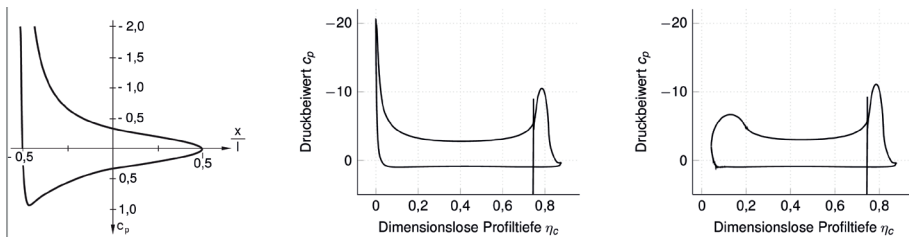


Abb. 3-6: Druckbeiwerte unterschiedlicher Profilkonfigurationen [11].

Folge ist. Wenn zusätzlich die Vorderkante des Profils abgesenkt wird, kann der Auftrieb weiter erhöht werden – rechtes Bild.

Abb. 3-6 verdeutlicht die Druckverteilung am Profil. Links ist der Druckbeiwert c_p ohne Coandă-Strahl und in der Mitte mit Coandă-Strahl und angestellter Klappe dargestellt. Im Bild rechts ist der Druckbeiwert c_p mit Coandă-Klappe und Senknase dargestellt. Die in [6, 11] veröffentlichten Druckbeiwerte verdeutlichen die Auftriebserhöhung durch die Profilmodifikationen.

Mit den Druckverteilungen nach Bild 3-6 sind unterschiedliche Phänomene verbunden. Die Druckverteilung links im Bild folgt der Potentialtheorie, die hier hinreichend genau ist. Im Zusammenwirken mit der elastischen Lagerung ist *Biege-Torsions-Flattern* möglich. Die mit den *Reynolds-averaged-Navier-Stokes-Gleichungen* (RANS) berechnete Druckverteilung mit Coandă-Effekt ist gleichmäßiger, sodass die Phänomenologie unterschiedlich ist. Abb. 3-7 zeigt die Auftriebsbeiwerte für unterschiedliche Anstellwinkel α und unterschiedlichen

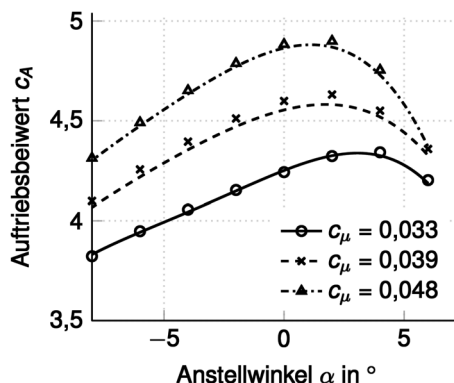


Abb. 3-7: Auftriebsbeiwerte eines Hochauftriebsprofils [11].

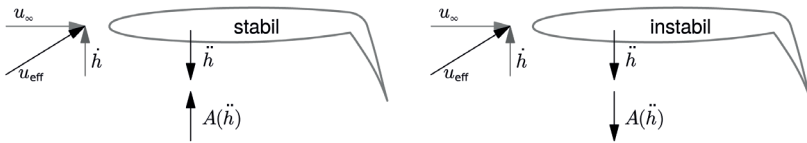


Abb. 3-8: Coandă-Profil bei mit α ansteigendem und abfallendem Auftriebsbeiwert

Massenfluss c_μ des Coandă-Strahls. Mit steigendem Massenfluss erhöht sich der Auftrieb erheblich und kann zum Teil genutzt werden. Befindet sich das Profil in der Nähe des Maximums kann ein reines Biegeflattern – ohne Torsion – initiiert werden, wenn der effektive Anstellwinkel um das Maximum oszilliert. Der effektive Anstellwinkel entsteht hierbei ausschließlich durch die Vertikalbewegung $h(t)$, die gemeinsam mit der Anströmgeschwindigkeit u_∞ eine periodische Veränderung des Anstellwinkels bewirkt.

Ursache für das Biegeflattern ist der abfallende Ast der Kennlinie, bei dem die Auftriebsänderung und die Beschleunigung gleichgerichtet sind, siehe Abb. 3-8 rechts.

4. Aeroelastische Phänomene an Brücken

Im Vergleich zu den relativ großen Geschwindigkeiten und den stromlinig geformten Profilen im Flugzeugbau, ist die Umströmung der in der Regel stumpfen Bauwerke im Hochbau und im Brückenbau von Ablösephänomenen und starken Turbulenzen geprägt, siehe Abb. 1-3. Nachfolgend werden zwei im Grundsatz verschiedene Phänomene vorgestellt, die in ihrem Auftreten unvorhergesehen waren und zu neuen Einsichten führten.

Abreiss-Flattern von Brückenprofilen

Vielfach untersucht und diskutiert ist der 1940 erfolgte Einsturz der *Tacoma-Narrows-Bridge* im US-Bundesstaat Washington, der zu völlig neuen Erkenntnissen führte. Weil bereits vor 1940 verschiedene weitgespannte Hängebrücken gebaut und ohne Probleme in Betrieb waren, kam der Einsturz der Brücke völlig überraschend. In Windkanalversuchen zeigt sich jedoch, dass das hier gewählte Brückenprofil aufgrund der Vollwandträger aerodynamisch instabil ist.

Aufgrund der geringen Torsionssteifigkeit der Brücke, die im Wesentlichen durch die infolge Eigengewicht vorgespannten Hänger realisiert wird, kann die Brücke um die Gleichgewichtslage schwingen, wenn eine entsprechende Anregung vorhanden ist. Die Anregung entsteht bereits bei mäßigen Windgeschwindigkeiten, da die an den Abreisskanten des Profils entstehenden Wirbel zu zeitlich veränderlichen Druckänderungen auf dem Profil führen, die eine Torsionsbewegung anregen kön-

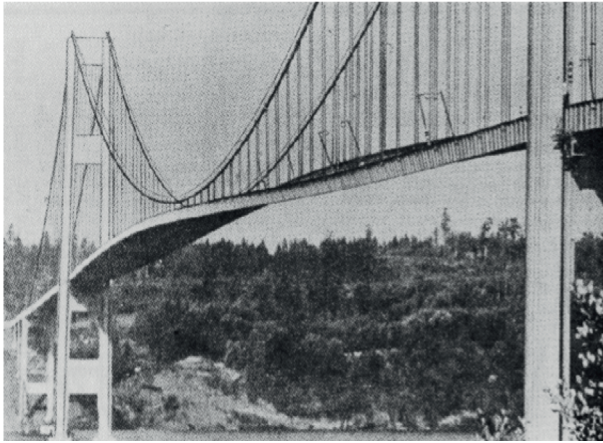


Abb. 4-1: Aerodynamisch angefachte Schwingung der Tacoma-Brücke.

nen. Sobald Torsionsverformungen auftreten, ändert sich die Anstellung der Vollwandträger zur Anströmung, was mit einer Änderung der Wirbelablösung verknüpft ist. Das Zusammenwirken von Wirbelablösung und elastischer Verformung bewirkt eine angefachte Schwingung, die letztendlich zum Einsturz der Brücke führte. Abb. 4-2 skizziert die mit den *RANS-Gleichungen* berechnete Druckverteilung während der Torsionsschwingung eines Modellquerschnittes bei Anströmung von links. Die numerische Untersuchung deutet an, dass nicht die *von Kármán'sche Wirbelstraße* für die Schwingung verantwortlich ist, sondern das Zusammenwirken der Torsionsschwingung mit den über den Querschnitt wandernden Wirbeln.

Regen-Wind-Induzierte Seilschwingungen

Ein erst seit wenigen Jahren untersuchtes Phänomen sind die *Regen-Wind-Induzierten Seilschwingungen*, die an verschiedenen Brückenbauwerken auftraten. Zur Überbrückung großer Spannweiten werden oft an Seilen abgehängte Fahrbahnen

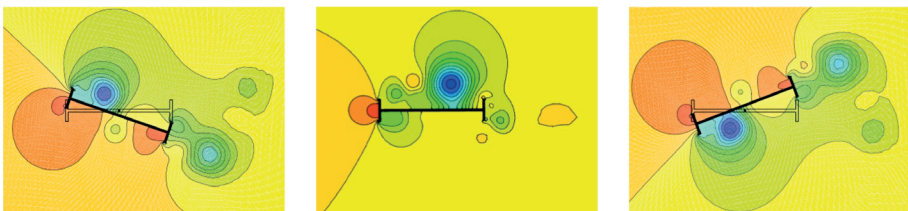


Abb. 4-2: Druckverteilung am Brückenprofil [5].



Abb. 4-3: Elbebrücke bei Dömitz.

eingesetzt. Die Seile vermitteln Transparenz und Leichtigkeit, sind jedoch aufgrund verschwindender Biegesteifigkeit schwingungsanfällig. Zur Vermeidung von Schwingungen werden in der Regel entsprechende Dämpfer an den Verankerungen vorgesehen. Obwohl die Bemessungsregeln eingehalten wurden, traten jedoch an der Erasmus-Brücke in Rotterdam, der Dömitz-Brücke über die Elbe und anderen Brückenbauwerken unerwartete Seilschwingungen auf, die die Tragfähigkeit der Brücken gefährdeten. Ursache für das Phänomen ist das Zusammenwirken von elastischem Seil, Luftumströmung des Seiles und die bei Regen entstehenden Wasserrinnsale entlang der Seile.

Seit langem ist bekannt, dass die Umströmung einer Kugel oder eines zylindrischen Körpers durch Störung der Grenzschicht massiv verändert werden kann. Prandtl [13] untersuchte diesen Effekt bereits 1914 und erreichte die Störung mithilfe eines Stolperdrahtes, den er auf einer Kugel am Ablösepunkt der ungestörten Strömung platzierte. In Abb. 4-4 links ist die Umströmung einer Kugel ohne und mit Stolperdraht dargestellt, siehe [10]. Aufgrund des *Stolperdrahtes* verändert sich der Nachlauf und damit die Druckverteilung auf dem umströmten Körper in Strömungsrichtung. Bei einem bei Regen vom Wind umströmten Seil übernehmen die auf dem Seil entstehenden Wasserrinnsale die Funktion des Stolperdrahtes. In Abb. 4-4 rechts sind die auf das Rinnsal wirkenden Kräfte skizziert. Infolge der Druckänderung beginnt das Seil zu schwingen, was wiederum zu einer Verschiebung der Rinnsale auf der Oberfläche des Seiles führt. Die infolge des Zusammenwirkens von Rinnsal und elastischem Seil entstehende periodische Schwingung besitzt aufgrund der Seilvorspannung zwar endliche Amplituden, führt jedoch zur Materialermüdung an den Verankerungsstellen der Seile.

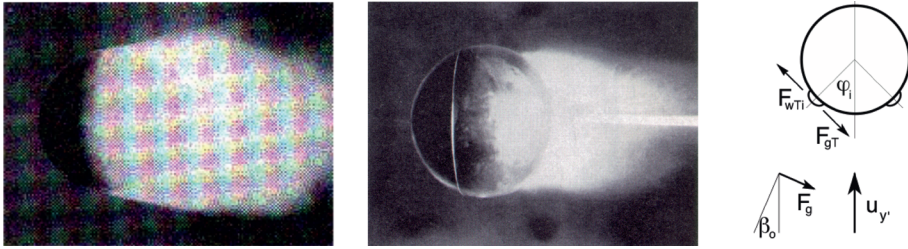


Abb. 4-4: Strömungszustände an Kugeln links ohne, rechts mit “Stolperdraht“ [10] Kräfte am Seilprofil [15].

5. Abschließende Anmerkungen

Das Zusammenwirken von Fluiden und festen Körpern zeigt viele überraschende Phänomene, die zum Teil entscheidend für die Bemessung von Flugzeugen, Brücken und anderen Strukturen sind. Die hier angegebenen Beispiele deuten die Vielfalt und die Schwierigkeiten an, die bei der Interpretation und der Quantifizierung der *kritischen* Situationen entstehen. Immer, wenn Tragwerke *leicht* gebaut werden sollen, besteht die Gefahr, dass neue Phänomene zu beachten sind, die mit den sonst üblichen Grenzen des Sicherheitskonzeptes nicht abgedeckt sind.

Literaturverzeichnis

- [1] AKAFLIEG BRAUNSCHWEIG e.V.: SB 9 – Akaflieg Braunschweig.
- [2] ARCHIMEDES: Abhandlungen. Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften (Band 201).
- [3] BISPLINGHOFF, R. & H. ASHLEY (1975): Principles of Aeroelasticity. JOHN WILEY & SONS, New York (1962) and Dover Publications, New York.
- [4] BOUGUER, P. (1746): Trait du Navire, de sa Construction et de ses Mouvements. In französischer Sprache, Jombert, Paris.
- [5] DINKLER, D., B. HÜBNER & E. WALHORN (2001): Analysis of Fluid – Structure Interaction using Stabilized Space–Time Finite Elements. in: Trends in Computational Structural Mechanics. W.A. WALL, K.-U. BLETZINGER & K. SCHWEIZERHOF (Eds.), CIMNE, Barcelona, Spain (2001)
- [6] DINKLER, D. & I. KRUKOW (2015): Flutter of circulation-controlled wings. – CEAS Aeronautical Journal **6**.

- [7] EULER, L. (1749): *Scientia Navalis seu Tractatus de Construendis ac Dirigendis Navibus*. in lateinischer Sprache, St. Petersburg. Neuveröffentlichung in: L. EULER (2003), *Opera Omnia*, Hrsg. Euler – Kommission der Schweizerischen Akademie der Naturwissenschaften, Birkhäuser, Basel.
- [8] FÖRSCHING, H.W. (1975): *Grundlagen der Aeroelastik*. Springer-Verlag.
- [9] FUNG, Y.-C. (1955): *An Introduction to the Theory of Aeroelasticity*. JOHN WILEY & SONS (1993), New York and Dover Publications, New York.
- [10] MEIER, E.G.H. (Hrsg.) (2002): *Ludwig Prandtl, ein Führer in der Strömungslehre*. Braunschweig, Vieweg.
- [11] NEUERT, N. & D. DINKLER (2019): Aeroelastic behaviour of a parameterised circulation controlled wing. – *CEAS Aeronautical Journal* **10**.
- [12] NOWACKI, H. & L.D. FERREIRO (2003): Historical Roots of the Theory of Hydrostatic Stability of Ships. 8Th International Conference on the Stability of Ships and Ocean Vehicles.
- [13] PRANDTL, L. (1914): *Der Luftwiderstand von Kugeln*. Nachrichten der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse.
- [14] RADESPIEL, R. & R. SEMAAN (Eds.)(2020): *Fundamentals of High Lift for Future Civil Aircraft*. in: *Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design*. Springer, to appear.
- [15] SEIDEL, C. & D. DINKLER (2006): Rain-wind Induced Vibrations - Phenomenology, Mechanical Modelling and Numerical Analysis. – *Computer & Structures* **84**.
- [16] SIMIU, E. & R.H. SCANLAN (1996): *Wind Effects on Structures*. JOHN WILEY & SONS, New York.
- [17] SOCKEL, H. (1984): *Aerodynamik der Bauwerke*. Vieweg, Braunschweig, Wiesbaden.
- [18] THEODORSEN, T. (1935): General theory of aerodynamic instability and the mechanism of flutter. – *NACA-Report* **496**.
- [19] VON KÁRMÁN, T. & E. TREFFTZ (1914): Über Längsstabilität und Längsschwingungen von Flugzeugen. – *Jahrbuch der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Luftfahrt*.
- [20] WILLIAMS, W.E. & G. BRYAN (1904): The longitudinal stability of Aerial Gliders. – *Proceedings of the Royal Society of London* **A73**.
- [21] YOUNG, T. (1800): Outlines of experiments and inquiries respecting sound and light. – *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* **90**.